Kapitel 3

Anwendungen der kombinatorischen Optimierung

Kombinatorische Probleme, wie sie von unserer Arbeitsgruppe bearbeitet werden, tauchen in vielfältiger Weise in der Produktions- und Logistikoptimierung auf. Hierbei zeigen sich in der betrieblichen Praxis oft viele Restriktionen, die die Komplexität der Probleme weiter erhöhen. Deshalb bildet die Praxistauglichkeit der Ergebnisse stets auch einen Maßstab, an dem wir unsere Arbeit messen.

In Zusammenarbeit mit den Firmen Profi.S und Profi.L aus Remscheid sind in unserer Arbeitsgruppe Pionierlösungen für praktische Problemstellungen aus dem Bereich Tourenplanung und Lagerverwaltung verwirklicht worden. Ein weiteres Projekt befaßte sich mit der Plazierung von Werbespots innerhalb von Werbeblöcken. Es zeigt sich immer wieder, daß kombinatorische Probleme in den verschiedensten Zusammenhängen verborgen sein können.

Wir wollen mit diesen Arbeiten zum einen den wichtigen Transfer zwischen Forschung und Industrie stärken. Zum anderen bilden derartige Projekte ein belebendes und motivierendes Element in der Arbeit unserer Mitarbeiter und Studenten. Dies halten wir für besonders wichtig angesichts der Notwendigkeit, wissenschaftliche Ausbildung zukunftsorientiert zu gestalten und damit den Einzelnen wie auch die Gesellschaft von den entwickelten Fähigkeiten profitieren zu lassen.

3.1 PARALOR – Parallele Algorithmen zur Lösung großer kombinatorischer Optimierungsprobleme

In dem vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) geförderten Verbundprojekt PARALOR wird untersucht, wie parallele Algorithmen der kombinatorischen Optimierung zur Lösung großer Optimierungsprobleme aus der industriellen Praxis eingesetzt werden können. In diesem Rahmen werden in unserer Arbeitsgruppe zwei konkrete Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Flugplanoptimierung und der integrierten Steuerung von Fertigungslagern bearbeitet. In beiden Fällen lassen sich eine Reihe von Teilproblemen identifizieren, deren algorithmische Behandlung für sich bereits sehr aufwendig ist. Der Einsatz herkömmlicher sequentieller Verfahren ist aufgrund der enormen Rechenzeiterfordernisse nur sehr eingeschränkt möglich. Parallele Systeme bieten hier eine Möglichkeit, in der Praxis auftretende Problemgrößen in vertretbarer Zeit zu bearbeiten. Ziel des PARALOR-Projektes ist die Entwicklung und Evaluation von Algorithmen, die das Potential dieser parallelen Rechnerarchitekturen nutzbar machen.

3.2 Flugplanoptimierung

Die Deutsche Lufthansa bietet wöchentlich knapp 10.000 Flüge an, die jeweils von einem der rund 250 Flugzeuge der Flotte bedient werden müssen. Jeder Flug wird von einer vier- bis achtköpfigen Crew begleitet, die aus dem 11.000 Menschen zählenden Flugpersonal des Unternehmens zusammengestellt wird. Die Erstellung möglichst kostengünstiger Flugpläne ist das Ziel dieses Projektes, welches von uns in Kooperation mit der Lufthansa Systems GmbH, der Gesamthochschule/Universität Paderborn und der Humboldt-Universität zu Berlin bearbeitet wird. Unser Hauptarbeitsgebiet ist dabei das Fleet Assignment, d. h. die optimale Zuordnung von Flugzeugtypen zu gegebenen Flugstrecken.

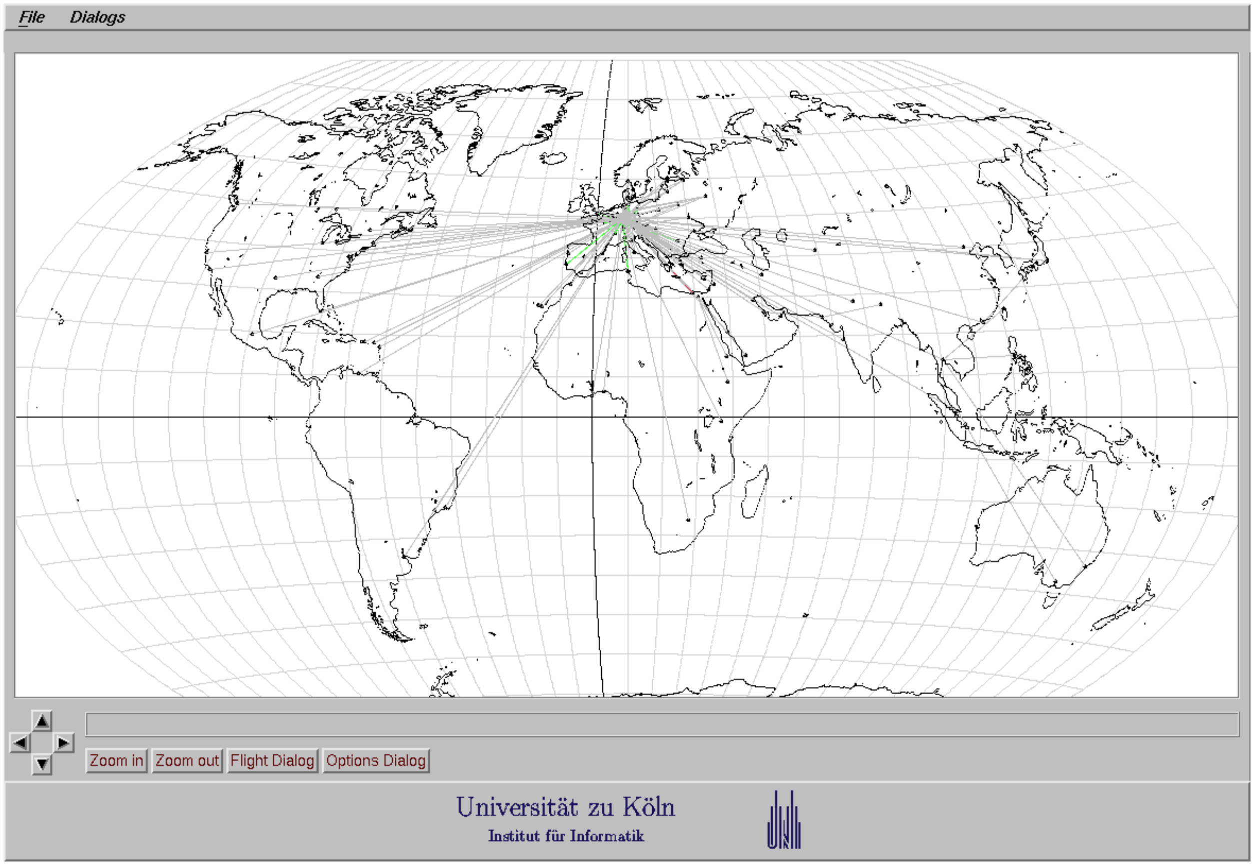

Abbildung 3.1: *Ausschnitt aus einem wöchentlichen Flugplan*

Beim Entwurf eines neuen Flugplans bestimmt die Gesellschaft zunächst, welche Verbindung zu welchem Zeitpunkt angeboten werden soll. Die Überprüfung, ob ein solcher Flugplan mit dem vorhandenen Material und den Beschäftigten realisierbar ist, erfordert einen hohen Einsatz von Erfahrung und Rechnerpotential. Dabei sind Wartungsintervalle und viele andere Restriktionen zu beachten. Bei der Kosten-Nutzen-Berechnung spielt die Analyse von Zubringerflügen eine herausragende Rolle. Es ist zu klären, wieviele Menschen, die beispielsweise die gewinnbringende Route von Köln über Frankfurt nach New York gebucht haben, überhaupt zum richtigen Zeitpunkt in Frankfurt sein können und wieviele Passagiere, die anschließend weiter nach Seattle, Miami oder San Francisco fliegen möchten, ebenfalls mitgenommen werden können. Darüber hinaus ist zu klären, ob der erstellte Flugplan eine effiziente Personaleinsatzplanung ermöglicht (Ruhepausen, Übernachtungskosten etc.). Der ungeheure Umfang des Problems ergibt sich daraus, daß jede Woche eine *halbe Million* solcher Reiserouten angeboten wird.

Beim Flugplandesign wird meist so vorgegangen, daß ein historisch gewachsener Flugplan an wenigen Stellen leicht modifiziert wird. So kann sich die Überprüfung der Realisierbarkeit sowie die Kostenbewertung an früheren Ergebnissen orientieren. Aufgrund des sich zunehmend verschärfenden Wettbewerbs müssen heute regelmäßig völlig neue Flugpläne entworfen werden. Rechner, wegen der Datenfülle insbesondere Parallelrechner, helfen dem Flugplandesigner dabei, ein konkurrenzfähiges Angebot der Gesellschaft für den Kunden zu erstellen.

Fleet Assignment

Nachdem geklärt wurde, zu welchem Zeitpunkt eine Flugverbindung („Leg“) angeboten wird, wird als nächstes festgelegt, welcher Flugzeugtyp („Equipment“), beziehungsweise welches konkrete Flugzeug („Tail“) einen Flug bedienen soll. Die Flugzeuge unterscheiden sich in der Kapazität, also der maximalen Anzahl der Passagiere, der maximalen Reichweite, sowie in den Kosten, die pro geflogenem Kilometer und befördertem Passagier verursacht werden. Durch das Fleet Assignment wird festgelegt, welcher Flugzeugtyp für die Gültigkeitsdauer des Flugplans jede Woche für eine bestimmte Flugverbindung verwendet wird. Die Kosten, die beim Fleet Assignment minimiert werden, sind vor allem Energiekosten. Diese liegen schon bei einem *wöchentlichen* Flugplan bei mehreren Millionen Mark.

Flußalgorithmen

Eine graphentheoretische Modellierung des Fleet-Assignment-Problems wird durch einen gerichteten Graphen $D = (V, A)$ gegeben, wobei die Knotenmenge V der Menge der einzelnen Direktflüge entspricht. Zwei Knoten $u, v \in V$ werden durch eine gerichtete Kante von u nach v verbunden, wenn es möglich ist, erst den Flug u und anschließend den Flug v mit demselben Flugzeug zu bedienen. Ein Fleet Assignment $F : V \to T$ weist jedem Flug $v \in V$ einen Flugzeugtyp $t \in T$ zu.

Zur Lösung von Fleet-Assignment-Problemen kleinerer Fluggesellschaften wird in der Literatur häufig ganzzahlige lineare Optimierung vorgeschlagen. Die Komplexität des zugrundeliegenden Mehrgüterflußproblems (die Flugzeugtypen werden als Güter aufgefaßt, die durch den Graphen D transportiert werden müssen) läßt dieses Vorgehen jedoch bei größeren Problemen nicht zu. Bei drei oder mehr verschiedenen Flugzeugtypen ist das Problem NP-schwer.

Eine Zuweisung kann aber gefunden werden, wenn die betrachtete Flottenmenge sukzessive in jeweils zwei Untermengen unterteilt wird, und ein Fluß durch den Graphen festlegt, welcher Flug von einer der beiden Mengen bedient wird. Bestehen die einzelnen Untermengen im Verlauf dieser Heuristik nur noch aus je einem Flugzeugtyp, hat man eine Lösung des Fleet-Assignment-Problems gefunden. Unsere Untersuchungen ergaben, daß eine solche Heuristik auf einer mittleren Workstation etwa 30 Minuten benötigt, um ein Fleet Assignment zu bestimmen. Ein gegebenes Assignment kann anschließend mit Austauschheuristiken oder Simulated Annealing mit einigen Stunden Rechenzeit noch nachgebessert werden.

Simulated Annealing

Hierbei betrachtet man nun den Flugplangraphen $G = (V, A)$ mit Flughafenmenge V und Teilflugmenge A. Die Nachbarschaft eines Flugplanes $F_1 = (G, e)$ (mit $e : A \longrightarrow E$, E Equipmentmenge) ist durch alle Flugpläne F gegeben, die sich auf genau einem gerichteten Kreis $C \subset A$ (mit $e|_C$ konstant in F bzw. G) in dem darauf eingesetzten Equipment unterscheiden. Die zu minimierende Zielfunktion wird dabei aus der Differenz der Kosten und Erlöse pro Passagier gebildet. Zum Auffinden eines Nachbarn, also zum Finden eines solchen „Equipment-Kreises" in F_1, verwenden wir eine Depth-First-Search-Strategie.

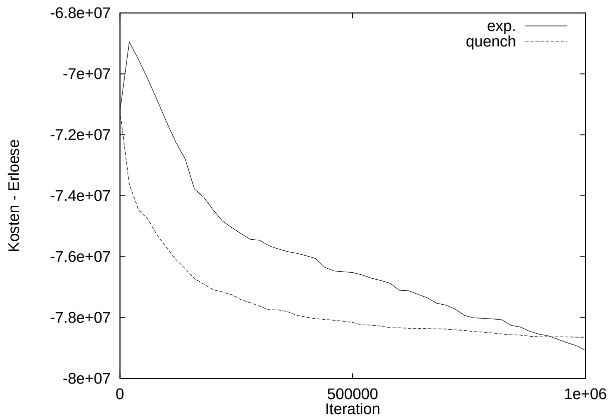

Abbildung 3.2: *Die Zielfunktion mit einem exponentiellen Cooling Schedule und mit Quenching*

Sowohl das Simulated-Annealing-Verfahren als auch unsere auf Flußalgorithmen basierende Heuristik sind leicht parallelisierbar. Simulated Annealing liegt bereits in einer parallelen Version vor. Realisiert wurde dies mit dem Message-Passing-Interface, was größtmögliche Portabilität gewährleistet. Sowohl die sequentiellen Algorithmen als auch das parallele Simulated Annealing liefern bereits gute Resultate. Mit Ergebnissen der weiteren Parallelisierungen rechnen wir planungsgemäß Ende 1996/Anfang 1997.

Die bisher erzielten Ergebnisse zeigen eine Gewinnsteigerung um bis zu 11 Prozent gegenüber der vorhandenen Startlösung, die einem historischen Flugplan der Lufthansa entspricht. Gleichzeitig konnten die Größen der benötigten Teilflotten reduziert werden. Verbesserungen erwarten wir vor allem in der Laufzeit, die derzeit einige Stunden beträgt.

Tail Assignment

Ist das Fleet Assignment festgelegt, so wird der wöchentliche Einsatzplan der einzelnen Flugzeuge bestimmt. Hierbei müssen wieder neue Restriktionen, insbesondere Wartungsintervalle, beachtet werden. Für jeden Flugzeugtyp $t \in T$ ist eine Zahl b_t gegeben, die angibt, wieviele einzelne Flugzeuge des Typs t vorhanden sind.

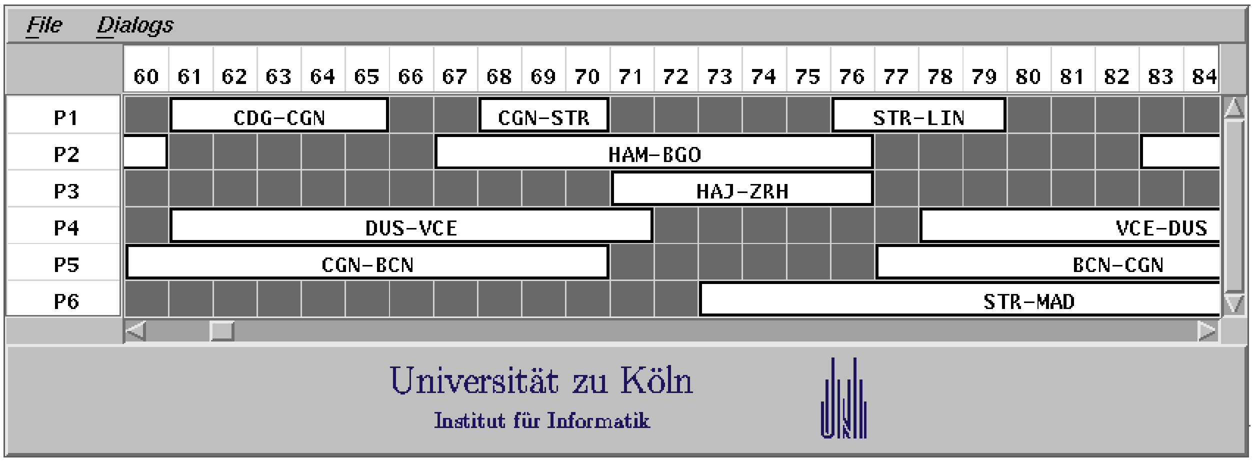

Abbildung 3.3: Ein Ausschnitt aus dem von uns berechneten wöchentlichen Einsatzplan

Für ein Fleet Assignment seien D_t die durch das Assignment induzierten Subgraphen von D mit $v \in D_t$, wenn $F(v) = t$ ist. Für jeden induzierten Subgraphen ist die minimale Anzahl von Ketten, die ihn überdecken, gleich der Anzahl der zu verwendenden Flugzeuge. Diese Zahl läßt sich mit Matchingalgorithmen in polynomieller Zeit berechnen. Ist sie kleiner als b_t für alle $t \in T$, so ist das Fleet Assignment unter dem Gesichtspunkt der rotationellen Verknüpfung zulässig. Eine überdeckende Kette entspricht dann dem Wochenplan eines Flugzeugs. Diese Berechnungsphase braucht pro Flugzeugtyp wenige Sekunden Rechenzeit auf einer mittleren Workstation.

Marktdaten

Bereits während des Aufbaus eines Fleet Assignments werden die Erträge überprüft, die sich durch eine Zuweisung erwarten lassen. Hierbei gilt es vor allem, die Passagierzusammensetzung auf Flügen, die von verschiedenen Reiserouten benutzt werden, zu kontrollieren. Eine Reiseroute wird im graphentheoretischen Modell als Hyperkante aufgefaßt, die aus mehreren Knoten, den zugehörigen Flügen, besteht. Diese Kanten werden durch den Ertrag, den ein Passagier auf dieser Route einbringt, bewertet. Auf den Knoten gibt die Kapazität des Flugzeugtyps die Zahl der Passagiere an, die auf diesem Flug transportiert werden können.

Auf den Reiserouten werden jetzt verschiedene Güter, d. h. die Passagiere, möglichst günstig durch das Netzwerk transportiert, so daß für jedes Gut in jedem Knoten die Flußerhaltung gewährleistet bleibt. Die Lösung dieses Mehrgüterflußproblems bestimmt den Wert des Fleet Assignments. Aufgrund der Datenmenge ist vor allem in dieser Berechnungsphase der Einsatz von Höchstleistungsrechnern unerläßlich, auf denen dann parallele Flußtechniken zum Einsatz gebracht werden.

3.3 Parallele Packalgorithmen

Das Vehicle-Routing-Problem – die Bestimmung kostenoptimaler Touren, auf denen Kunden ausgehend von einem Depot beliefert werden – wird wie zahlreiche Scheduling- und Packungsprobleme schon seit längerem in der kombinatorischen Optimierung untersucht. Sowohl im Bereich der internen Logistik (Lagerorganisation) als auch im Bereich der externen Logistik (Transport) treten aber häufig komplexe Optimierungsaufgaben auf, in denen diese Probleme kombiniert sind. So muß beispielsweise bei der Auftragszusammenstellung ein Kommissionierungswagen auf kürzestem Weg durch das Fertigungslager gesteuert und mit unterschiedlichen Paketen beladen werden. Bei Just-in-time-Produktion werden Produkte nach ihrer Fertigstellung – ohne Zwischenlagerung – direkt in LKW verpackt und an die Kunden ausgeliefert. Hier besteht ein enger Zusammenhang zwischen Vehicle-Routing-Problem (in welcher Reihenfolge werden die Kunden beliefert), Stauraumoptimierung und Scheduling (in welcher Reihenfolge werden die Produkte hergestellt).

Zusammen mit der Forschungsgruppe um Professor Monien an der Universität Paderborn und der Remscheider Unternehmensberatung Profi.L, deren Schwerpunkt im Bereich Transport und Logistik liegt, wird in unserer Arbeitsgruppe das PARALOR-Teilprojekt „Integrierte Steue-

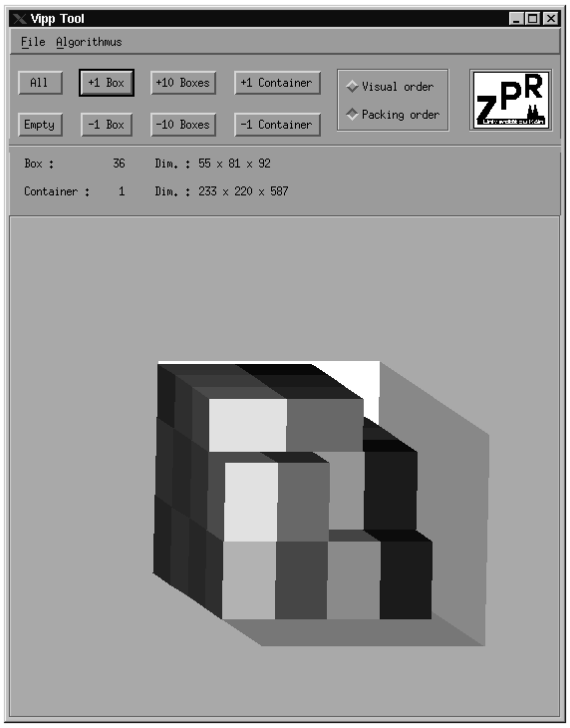

Abbildung 3.4: *Visualisierung eines dreidimensionalen Packmusters*

rung von Fertigungslagern“ bearbeitet. In diesem Rahmen untersuchen wir sequentielle und parallele Verfahren zum Packen gleicher oder verschiedenartiger zwei- oder dreidimensionaler Objekte in einen oder mehrere Behälter (z. B. Container, Euro-Paletten) und ihre Visualisierung (Bild 3.4). Diese Verfahren sollen zusammen mit Algorithmen zur Wegeminimierung und Plazierung im Lager sowie mit Tourenplanungsalgorithmen in einer integrierten Lageroptimierung vereinigt werden.

In einer industriellen Fallstudie wurde das dreidimensionale Packen von Artikeln mit komplexer Geometrie behandelt. Das dabei entwickelte Verfahren befindet sich seit April 1995 bei einem Hersteller von Sanitärartikeln im Einsatz. Als Kernproblem identifizierten wir die *homogene Kommissionierung von Wannen*, ein Packungsproblem, das wir sowohl als *Bin-Packing-Problem* mit nachfolgerabhängigen Gewichten als auch als *Vehicle-Routing-Problem* mit Kapazitätsbeschränkung formuliert haben. Letzteres ist bemerkenswert, da die ursprüngliche Interpretation des Vehicle-Routing-Problems aus einem völlig anderen Anwendungsbereich stammt, nämlich der Planung einer optimalen Auslieferungstour z. B. für LKW. Eine eingehendere Darstellung sowie eine Beschreibung der angewandten sequentiellen Algorithmen findet sich im Jahresbericht 1993/1994.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen haben wir im Jahre 1995 drei Möglichkeiten untersucht, Parallelrechner zur Lösung dieses Problems einzusetzen: eine kundenweise Aufspaltung (d.h. die Auftragsbestände verschiedener Kunden werden gleichzeitig auf verschiedenen Rechnerknoten bearbeitet), eine funktionale Dekomposition (also die Zerlegung des Programms in unabhängige Funktionseinheiten, die gleichzeitig abgearbeitet werden können) und das am ZPR ursprünglich zur Tourenplanung entwickelte parallele „Simulated Trading“.

Mit einer Implementierung der kundenweisen Aufspaltung wurden auf dem Parsytec GCel-3/1024 des ZPR, einem massiv-parallelen System mit 1024 Prozessoren, Real-World-Probleme mit bis zu 8300 Posten effizient bearbeitet. Diese Art der Parallelisierung lieferte schon bei kleinen Problemen gute Ergebnisse, so daß man sie in der Praxis auf jeden Fall einsetzen sollte, falls Performanceprobleme auftreten und insbesondere, wenn die Probleminstanzen größer werden sollten.
Die funktionale Dekomposition erwies sich erst bei Kunden mit sehr großer Postenanzahl als sinnvoll einsetzbar. Sie sollte dann zusätzlich zur kundenweisen Aufteilung verwendet werden.
Im parallelen Simulated Trading werden mehrere Simulated-Trading-Prozesse parallel auf mehrere Palettencluster angewendet. Die Tauglichkeit dieses Algorithmus für das Packproblem konnte experimentell bestätigt werden.

Für die Fallstudie „Packen von Sanitärartikeln“ kann insgesamt festgehalten werden, daß für die momentan aktuellen Praxisprobleme eine Parallelisierung nicht notwendig ist, was sich aber bei der sich abzeichnenden Vergrößerung der Produktpalette in den nächsten Jahren ändern kann.

3.4 Tourenplanung

Tourenplanung bei Rungis Express

Die Forschungsarbeiten im Bereich Tourenplanung werden im Projekt *Optimale Linienführung und Routenplanung in Verkehrssystemen* (kurz: OptiLRV) vom BMBF gefördert. Es handelt sich hierbei um ein Teilvorhaben des Förderprogrammes *Anwendungsorientierte Verbundvorhaben auf dem Gebiet der Mathematik*.

In diesem Projekt wurden u. a. neue Verfahren für die Tourenplanung bei „Rungis Express", einem Frischwarenlieferanten für Restaurants und Feinkostläden, entwickelt. Das dort zu lösende Vehicle-Routing-Problem hat folgende Ausprägungen: ein Depot (Meckenheim), inhomogener Fuhrpark (50 Fahrzeuge) und Bedienzeitfenster bei den Kunden. Diese Zeitfensterrestriktionen machen das Problem schwierig, da für viele Liefertage keine gültige Lösung existiert, bei der jeder Kunde während seiner Öffnungszeiten beliefert werden kann.

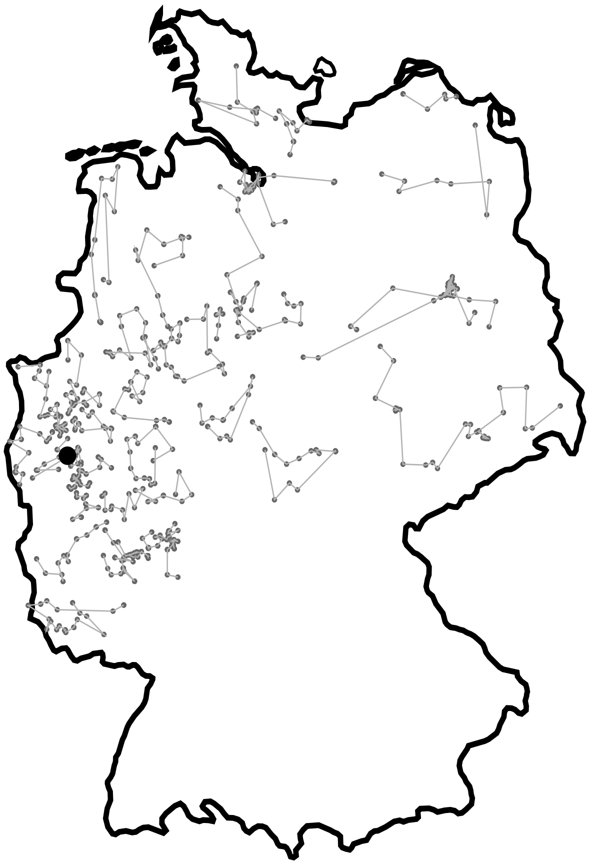

Abbildung 3.5: *Ergebnis einer Tourenplanung mit Zeitfenstern*

Ein gängiges Mittel, in solchen Fällen möglichst nah an eine zulässige Lösung zu gelangen, ist die Bewertung von Verspätungen mit Strafkosten. Dieser Ansatz führt bei dem hier vorliegenden Problem nicht zum Ziel, da Kunden ihre „Wertigkeit" ändern können. Damit wird der Aufwand, alle 700-1000 Kunden vor jeder Planung in verschiedene Kategorien zu sortieren, zu hoch. Statt dessen wird der Ansatz verfolgt, möglichst viele Kunden „in time" einzuplanen. Die nicht zulässig zu bedienenden Kunden werden vom Disponenten nachträglich manuell eingeplant. Die Entscheidung darüber, bei welchen Kunden dabei Verspätungen in Kauf genommen werden, trifft der Disponent in telefonischer Absprache mit den Betroffenen.

Folgende aus der Praxis motivierten Vorgaben haben das Design des Verfahrens beeinflußt: Es sollen regional beschränkte Touren geplant werden, um die Gebietskenntnis der Fahrer auszunutzen. Außerdem dürfen sich die Touren nicht kreuzen. Eine weitere Einschränkung ist der Einsatz von PCs, auf denen die Planung in wenigen Minuten durchgeführt werden soll.

Dazu wurde ein spezielles Verfahren entwickelt, das zunächst eine Clusterung der zu verplanenden Aufträge vornimmt. In einem zweiten Schritt werden später in *jedem* so entstandenen Cluster die Kunden mit Hilfe eines Insert–Verfahrens zu *einer* zulässigen Tour zusammengestellt (Cluster first – Route second). Zur Clusterung berechnet man einen minimalen aufspannenden Baum auf allen zu verplanenden Kunden, wobei die Kantengewichte durch die Distanzen im Straßennetz gegeben sind. Durch Entfernen einer Teilmenge der Kanten wird der Baum in mehrere Teile geteilt. Die Kunden in jedem Teilbaum sollen in einer Tour verplant werden. Für die so entstandenen Kundenmengen (Cluster) wird die Einhaltung von Restriktionen auf folgende Größen überprüft:

1. Kundenanzahl pro Tour,
2. Tourlänge (Summe der Kantengewichte im Baum mal Umwegfaktor),
3. Kapazität,
4. Anzahl von Kunden mit kritischen Zeitfenstern.

Die Anzahl von Kunden mit kritischen Zeitfenstern (z. B. weniger als drei Stunden Lieferzeit oder Lieferung bis 12.00 h) werden begrenzt, um ein zulässiges Routing zu ermöglichen. Es wird jeweils ein den obigen Restriktionen genügender Teilbaum mit möglichst vielen Kunden abgetrennt und für den Restbaum die Iteration erneut durchgeführt. Innerhalb dieses Clusterverfahrens ist ein sogenanntes Tree-Partitioning-Problem mit mehreren Knotengewichtsfunktionen zu lösen. Die Gewichte modellieren dabei die Restriktionen 1–4. Es konnte gezeigt werden, daß dieses Problem im allgemeinen NP-schwer ist. Wir haben daher eine Greedy-Heuristik entwickelt, die für die bei Rungis vorliegenden Tourenplanungs-Instanzen gute Ergebnisse liefert.

Das anschließende Routing innerhalb jedes Clusters geschieht durch eine Einfügeheuristik. Dazu werden die Kunden nach Länge und Anfangszeitpunkt der Zeitfenster sortiert. Man sucht nun eine Menge von Kunden mit disjunkten Zeitfenstern, für die ihre Bedienreihenfolge durch die Abfolge der entsprechenden Fenster vorgegeben ist. Die übrigen Kunden werden in der sortierten Reihenfolge nacheinander an die günstigste gültige Position eingefügt. Existiert keine solche, so versucht man, durch Löschen eines schon geplanten Stops aus der Tour und Einfügen des aktuellen Stops eine kürzere Tour zu generieren. Nach einer festen Anzahl von Einfügeoperationen wird mit Hilfe eines 3-Opt-Verbesserungsverfahrens versucht, mögliche Schleifen, die sich durch eine ungünstige Einfügereihenfolge ergeben können, zu eliminieren.

Uns liegen Praxisinstanzen mit Kundenmengen zwischen 743 und 942 vor, die auf maximal 50 Fahrzeuge zu verteilen sind. Für diese Instanzen bleiben zwischen 20 und 48 Kunden als nicht verplanbar übrig, diese werden dann manuell ohne Generierung von zusätzlichen Touren eingeplant. Die Anzahl der Fahrzeuge wurde im Vergleich zu dem tatsächlich gefahrenen Tourenplan durchschnittlich um 3 reduziert. Bei Instanzen mit wenigen Kunden waren sogar Einsparungen von bis zu 8 Fahrzeugen möglich. Abbildung 3.4 zeigt eine solche Planung, bei der 983 Kunden auf 41 Touren verteilt wurden. Dabei mußten nur 43 Kunden vom Disponenten manuell eingeplant werden. Die Überschneidungen im Verlauf einiger Touren ergeben sich durch die Zeitrestriktionen.

Abbildung 3.6: *Verladung von Containern auf LKWs*

Kooperation mit Profi.S

Im Rahmen der seit 1991 bestehenden Kooperation mit der Profi.S GmbH Remscheid wurde die Entwicklung des von uns konzipierten Tourenplanungsprogrammes Profi-Tour++ vorangetrieben. Seit kurzem ist bei der Spedition *Internationale Möbellogistik GmbH* (IML) in Nordwalde eine Version des Programmes im operativen Einsatz.

In unserer Arbeitsgruppe wurde die Rohversion des Simulated Trading Algorithmus zu einem in der Praxis einsetzbaren Verfahren zur Disposition des IML-Fuhrparks weiterentwickelt und in das Programmpaket integriert. Hierbei lag die Hauptschwierigkeit in der Erstellung einer geeigneten Kostenfunktion. Die Berechnung eines Kostenwertes, der unstetige Parameter wie Fahrerpausen und Übernachtungen berücksichtigt, stellte sich als sehr rechenintensiv heraus. Es mußte daher ein geeigneter Kompromiß zwischen den Effizienzanforderungen des Verfahrens und der vom Anwender geforderten Realitätsnähe der Lösung gefunden werden.

Für die Zukunft ist geplant, weitere mathematische Verfahren in dieser Weise für die Praxis zu erschließen. Dabei untersuchen wir zum einen Algorithmen, bei denen eine geschickte regionale Clusterung vorgenommen wird, zum anderen werden Ansätze der sogenannten Column-Generation-Methode für exakte Lösungen analysiert. Die Kontakte zur Profi.S und ihren Partnern helfen uns, immer neue praktische Fragestellungen aus dem Bereich des Vehicle Routings und der Logistik kennenzulernen.

3.5 Optimale Plazierung von Werbespots

In den letzten Jahren erlebte die Fernsehwerbung in Deutschland durch die Einführung des Privatfernsehens einen regelrechten Boom. Waren zu Zeiten des alleinigen öffentlich-rechtlichen Fernsehens Sendeplätze für Werbespots noch Mangelware – die Werbekunden kauften jeden Spot, den sie bekommen konnten – eröffnete der neue Markt der privaten Anbieter den Kunden erstmals die Möglichkeit der Auswahl und damit der Optimierung.

Werbeagenturen kaufen jeweils für ein Jahr im voraus Sendeplätze für die von ihnen vertretenen Produktanbieter ein. Diesen Sendeplätzen werden dann jeweils einen Monat im voraus konkrete Werbespots für einzelne Marken zugewiesen. Das Ziel ist es jetzt, die Summe der für die einzelnen Marken („brands") erreichten relevanten Zuschauer durch eine optimale Zuteilung der Werbespots auf die Werbeplätze („slots") zu maximieren. Hierbei müssen zahlreiche Nebenbedingungen eingehalten werden, wie z. B. Budget-

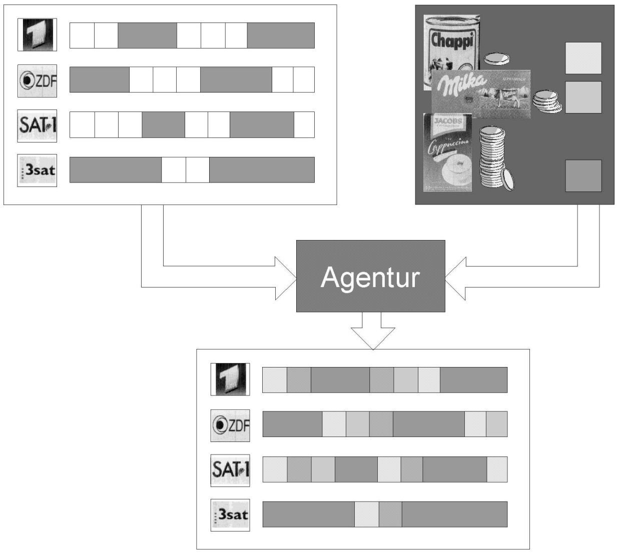

Abbildung 3.7: *Zuordnung von Werbespots zu Werbeblöcken*

beschränkungen der einzelnen Marken oder das Trennen der Werbung für Produkte der gleichen Kategorie.

Das oben beschriebene Problem wurde von uns gemeinsam mit einem der größten deutschen Werbekunden und dessen Mediaagentur spezifiziert und in ein formales Modell umgesetzt. Hierbei konnten wir beweisen, daß bereits das Finden einer zulässigen Lösung aufgrund der Nebenbedingungen schwierig (NP-vollständig) ist. Dies gilt selbst dann, wenn man auf eine Reihe von Nebenbedingungen, wie z. B. Mindestzuschauerzahlen für bestimmte Marken, verzichtet. Zur Lösung mußten daher geeignete Näherungsverfahren eingesetzt werden.

Es zeigte sich, daß insbesondere mit Hilfe des Simulated-Annealing-Verfahrens gute Lösungen gefunden werden konnten. Durch eine spezielle Modellierung der Zielfunktion gelang es uns dabei, Unzulässigkeiten so zu „bestrafen“, daß das Verfahren schnell in Richtung einer zulässigen Lösung gelenkt wurde. Insbesondere war darauf zu achten, daß Marken mit einem kleinen Werbebudget oder schwer zu erreichenden Zielgruppen nicht vernachlässigt wurden.
Uns lagen verschiedene Originaldatensätze vor, auf die wir die Verfahren angewendet haben. Dabei waren die Lösungen stets 10 % besser als die tatsächlich zum Einsatz gekommenen Mediapläne. Insbesondere konnten im Gegensatz zu den Originalplanungen in fast allen Fällen Lösungen erzielt werden, die sämtliche Nebenbedingungen einhielten.

3.6 Scheduling einer Latex-Produktionsanlage

Der Ablauf chemischer Produktionsprozesse besteht aus einer großen Anzahl einzelner Schritte, deren Reihenfolge es zu optimieren gilt. Aufgrund der hohen Komplexität dieser Aufgaben existiert bei den praktisch eingesetzten Lösungen noch ein enormes Einsparungspotential für Verbesserungen mit Hilfe moderner Optimierungsverfahren. Einen Algorithmus für die Optimierung des Ablaufs solcher chemischer Prozesse haben wir exemplarisch an einer Produktionsanlage für Latex-Kunststoffe entwickelt und implementiert.

Problemstellung und Modellierung

Gegeben ist eine Menge von Produkten, die bis zu ihrer Fertigstellung in einer Anlage eine Reihe von Bearbeitungsschritten durchlaufen. Eine solche Anlage setzt sich aus verschiedenen Teilen (Komponenten) zusammen, in denen die einzelnen Produktionsschritte ablaufen. Eine Komponente besteht aus Maschinen, die in Klassen (Ma-

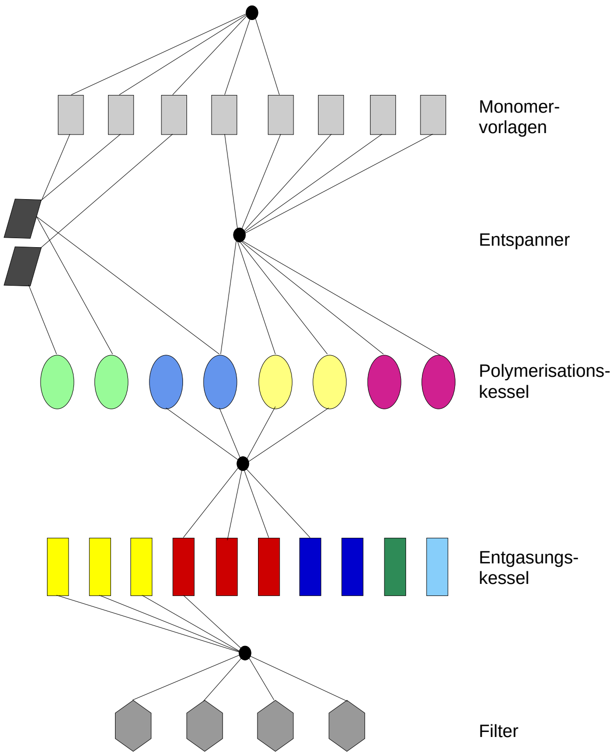

Abbildung 3.8: *Schematischer Ablaufplan Latex-Produktionsanlage*

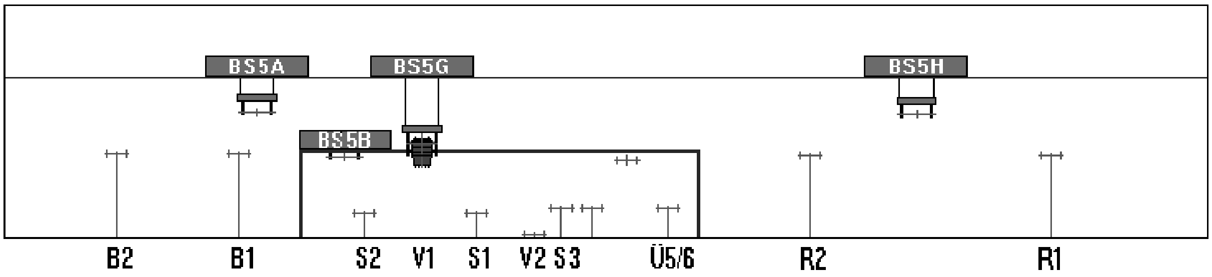

Abbildung 3.9: *Seitenansicht der Krananlage. Es existieren vier Kräne, von denen drei sich auf einer Schiene befinden (Oberkräne), während der vierte eine eigene Schiene benutzt.*

schinentypen) eingeteilt sind. In Komponenten mit mehr als einem Maschinentyp ist für jedes Produkt die Liste der Maschinen gegeben, von denen es weiterverarbeitet werden kann. Von jedem Produkt wird eine Menge hergestellt, die in einzelne Aufträge (Jobs) unterteilt ist. Für jeden Job sind die Zeiten der zugehörigen Bearbeitungsschritte (Tasks) auf den entsprechenden Komponenten und ihre Maschinenzuordnungen bekannt. Zwischen den Tasks eines Jobs sind durch den Produktionsablauf außerdem zeitliche Abhängigkeiten (Restriktionen) zu beachten. So belegt ein Umfüllvorgang zur gleichen Zeit zwei Maschinen auf unterschiedlichen Komponenten. Weitere Restriktionen können durch Vor- oder Nachbereitungsvorgänge bestimmt sein. Die Komponenten werden bei der Herstellung aller Produkte nacheinander in einer festen Reihenfolge durchlaufen. Ziel der Optimierung ist es, die Aufträge so eng aufeinanderfolgend wie möglich den Maschinen zuzuordnen, um die Summe der Leerzeiten aller Maschinen zu minimieren.

Lösungsansatz und Verfahren

Wir haben ein Enumerationsverfahren zum Intervallscheduling entwickelt, das die beste z. Zt. bekannte Komplexität aufweist. Die äußerste Schale des Verfahrens bildet eine Listenplanung mit Prioritätsregeln. Nach der Initialisierung existiert eine Liste aller einzuplanenden Jobs (freie Jobs) sowie eine anfänglich leere Liste bereits verplanter Jobs. Freie Jobs werden sukzessive verplant, wobei zunächst nur die Anfangszeiten festgelegt werden. Bei der Festlegung eines Jobs werden für jeden noch verbleibenden freien Job die Zeiten bestimmt, zu denen die entsprechenden Tasks frühestmöglich beginnen können. Diese Zeiten werden bei der Auswahl des jeweils als nächstes zu verplanenden Jobs berücksichtigt.

Das Scheduling-Problem wird auf den verschiedenen Ebenen mit unterschiedlichen Ansätzen gelöst. Auf Komponentenebene handelt es sich um einen Enumerationsansatz, der bei Anlagen mit einem begrenzten Maschinenpark sinnvoll ist. Das Verfahren ist in diesem Punkt optimal. Ein solcher Ansatz ist auf Anlagenebene nur bei einer kleinen Anzahl von Jobs praktikabel, da man hierzu alle möglichen Anordnungen von Jobs betrachten muß. Bei Anlagen, bei denen der Großteil des Einsparungspotentials in der optimalen Belegung einzelner Komponenten liegt, die Engpässe im Produktionsprozeß darstellen, ist dies aber gar nicht vonnöten. Deshalb haben wir hier eine Greedy-Heuristik gewählt, die Ergebnisse liefert, die beweisbar relativ nah am Optimum liegen.

Das Modell wurde in einer Unix-Umgebung implementiert, die zugehörigen Programme sind in Form einer Bibliothek verfügbar.

3.7 Steuerung einer Transportkrananlage

Bei vielen praktischen Schedulingproblemen muß neben der Festlegung der Maschinenbelegungszeiten auch das Problem der Transporte der Werkstücke zwischen den einzelnen Maschinen gelöst werden. Eine gängige Technologie zur Abwicklung solcher Transporte ist eine Krananlage, bei der sich die Kräne auf einer über den Maschinen befindlichen gemeinsamen Schiene bewegen.

In der Regel wird die Steuerung der Krananlage bei der Erstellung des Produktionsplanes vernachlässigt und dem Disponenten vor Ort überlassen. Dieser Ansatz ist in Fällen, in denen das Transportsystem einen Engpaß des Produktionsablaufes bildet, nicht gerechtfertigt.

Bereits in der Vergangenheit wurde an unserem Institut die Steuerungsproblematik solcher eindimensionaler Transportsysteme am Beispiel der Krananlage in einer Galvanisierhalle untersucht. Wichtige Nebenbedingungen resultieren aus dem Verbot von Überholvorgängen (alle Kräne fahren auf der gleichen Schiene), sowie aus den gesetzlich und technisch vorgegebenen Mindestabständen zwischen den einzelnen Kräne. Es konnte gezeigt werden, daß das Steuerungsproblem in dem speziellen Fall der Galvanisieranlage effizient zu lösen ist, d.h. es ist möglich, für einen vorgegebenen Schedule in polynomieller Zeit die minimale Anzahl Kräne zu bestimmen, die zu seiner Abarbeitung notwendig sind.

In einem Anschlußprojekt, das wir derzeit zusammen mit dem Systemhaus für Informationstechnologie Mannesmann Datenverarbeitung GmbH durchführen, übertragen wir diese Ergebnisse auf allgemeinere Krananlagen. Es wird speziell eine automatische Steuerung für ein Transportsystem in der Gießhalle eines Stahlwerkes (Bild 3.9) entwickelt. Es ist geplant, das Verfahren im Frühjahr 1997 in den Produktionablauf vor Ort zu integrieren. Dort kann der Krandisponent die Ergebnisse der Optimierung manuell nachbearbeiten und das Resultat mit Hilfe eines Simulationstools visuell überprüfen.